DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2025.05.008
CSTR: 32220.14.gk202505008

基于夜光遥感数据的合肥市碳排放时空分布特征研究

赵 强[1,2,3]， 谭 璐[4*]， 方潜生[1,2]， 刘常瑜[1,2,3]， 易明建[1,2,3]

(1 安徽建筑大学环境与能源工程学院，安徽 合肥 230601；
2 安徽省建设领域碳达峰碳中和战略研究院，安徽 合肥 230601；
3 安徽省智慧城市工程技术研究中心，安徽 合肥 230601；
4 安徽省皖能能源交易有限公司，安徽 合肥 230011)

摘 要： 以合肥市为研究区域，对合肥市碳排放量进行核算，结合夜间灯光遥感数据建立灯光总灰度值与碳排放总量的数学模型，得到合肥市近 8 年的碳排放时空分布特征图。综合运用标准差椭圆等方法对合肥市碳排放时空特征进行相关分析，得出以下结论：(1) 从直接碳排放量看，净碳排放量与各土地利用类型的碳源和碳汇密切相关，其中，林地的碳汇量占碳汇总量 70% 以上。(2) 从间接碳排放量看，建筑碳排放量从 2010 年的 1765.96 万 t 增加到 2019 年的 3716.58 万 t，增长了 110.5%。(3) 从合肥市碳排放时空分布特征来看，在合肥市东西方向上，存在明显的峰谷，具有较强的倒“U”型趋势；在南北方向上，则呈现出由北到南线性增加的分布趋势，南部的碳排放量明显高于北部。

关 键 词： 夜光遥感; 土地利用; 碳排放; 时空演变
中 图 分 类 号： X87 **文 献 标 识 码：** A **文章编号：** 1673-6141(2025)05-652-014

Research on spatiotemporal characteristics of carbon emissions in Hefei City based on night light remote sensing data

ZHAO Qiang[1,2,3], *TAN Lu*[4*], *FANG Qiansheng*[1,2], *LIU Changyu*[1,2,3], *YI Mingjian*[1,2,3]

(1 School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2 Anhui Institute of Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality in Urban-Rural Development, Hefei 230601, China;
3 Anhui Engineering and Technology Research Center of Smart City, Hefei 230601, China;
4 Anhui Wanneng Energy Trading Co., Ltd, Hefei 230011, China)

Abstract: Taking Hefei City, China, as the research area, the carbon emissions of the city were calculated, and then on the basis of the establishment of the mathematical model of the total gray value of lights and the total carbon emissions based on the nighttime light remote sensing data, the spatiotemporal distribution characteristic map of carbon emissions in Hefei City in the past eight years was obtained. to the spatial and

基金项目： 国家自然科学基金 (41005016), 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目 (gxyqZD2020036)
作者简介： 赵 强 (1981-), 安徽合肥人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事环境遥感技术以及城市空间信息技术应用方面的研究。E-mail: rommel99@163.com
收稿日期： 2022-07-06; **修改日期：** 2022-08-19
***通信作者**。E-mail: 18605654950@163.com

temporal characteristics of carbon emissions in Hefei City was analyzed comprehensively using standard deviation ellipse and other methods. The following conclusions are drawn: (1) From the perspective of direct carbon emissions, net carbon emissions are closely related to the carbon sources and carbon sinks of various land use types. Among them, the carbon sink of forest land accounts for more than 70% of the total carbon sink. (2) In terms of indirect carbon emissions, the carbon emissions from building increased from 17, 659, 600 tons in 2010 to 37, 165, 800 tons in 2019, with an increase of 110.5%. (3) Regarding to the spatiotemporal distribution characteristics of carbon emissions in Hefei City, there are obvious peaks and valleys in the east-west direction of Hefei City, with a strong inverted "U"-shaped trend. While in the north-south direction, it shows a linearly increasing distribution trend from north to south, and the carbon emissions in the south are significantly higher than those in the north.

Key words: night light remote sensing; land use; carbon emissions; temporal and spatial evolution

0　引　言

为应对温室效应，全球从政策制定、国际合作、碳捕捉碳封存技术创新等多个方面采取了一系列措施。国际社会通过多次气候大会建立了气候治理基础，许多国家积极响应，提出碳中和时间表，并通过建立碳市场、能源转型等行动加速脱碳。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 于 1996 年出版首份国家温室气体排放指南，随后又于 2006 年更新出版新版指南并沿用至今，为碳排放核算方法奠定了基础[1]。

夜间灯光数据是一种在夜间收集的对地表可见光-近红外电磁波信息的卫星遥感数据。目前常用的夜间灯光数据主要来源于航天遥感平台：DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System) 影像、NPP/VIIRS (National Polar-orbiting Partnership/Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) 影像和国产卫星珞珈一号卫星[2]。这些数据常被用于城市人口分布调查[3]、大城市群识别等方面[4]。夜光遥感数据为城市碳排放核算提供了有效的补充手段，可显著提升碳排放评估的精度。利用夜光遥感数据进行碳排放评估与 GIS (Geographic information science) 技术具有天然的兼容性，二者的协同应用能够实现碳排放的空间可视化分析与动态监测，可为低碳城市建设的政策制定和成效评估提供科学依据。

城市作为碳排放的主要来源，研究其碳排放量变化趋势对预测碳达峰并采取相应对策具有重要参考意义[5]，相关结论可为合肥市近零碳示范园区建设及低碳城市发展路径规划提供理论支撑，同时有助于增强城市规划方案的空间合理性。

本文系统核算了合肥市 2012－2019 年的直接与间接碳排放量。通过整合 NPP/VIIRS 夜光遥感时序数据，建立了基于灯光灰度特征的碳排放估算模型，进而实现了合肥市碳排放时空格局的模拟与可视化表达。综合运用标准差椭圆和全局趋势分析等方法对合肥市碳排放时空分布特征进行相关分析，为合肥市碳排放政策的制定提供数据支撑。

1　研究区与研究数据

1.1　研究区概况

本文以合肥市为研究对象进行研究 (图 1)。合肥市作为安徽省省会，地处长江三角洲西侧，属于典型的

亚热带季风气候，四季分明。人口分布呈现明显的中心集聚特征，2022年常住人口约963万，城镇化率超过80%。主城区人口密度高，尤其是庐阳、蜀山等老城区，而周边县域人口相对稀疏但增长较快。近年来，随着产业转移和城市扩张，大量人口向滨湖新区、高新区等新兴区域聚集。降低城市能源消耗，建设低碳城市，是合肥市当前面临的现实问题之一。

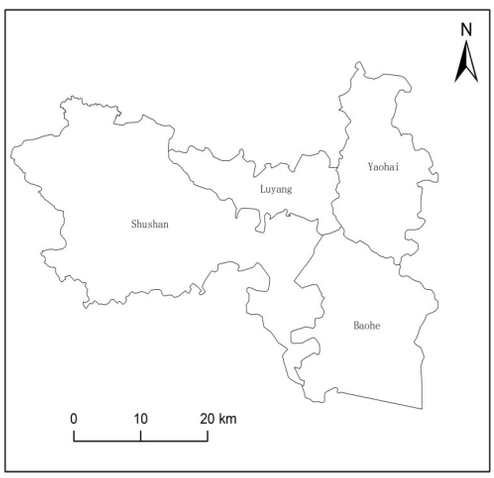

图 1 合肥市辖区行政区边界

Fig. 1 Hefei City administrative district boundary

1.2 数据来源与处理

土地利用碳排放效应是指由人类活动驱动的土地利用/覆被变化所导致的区域碳循环过程改变，其作用机制主要体现在碳源排放增强与碳汇功能削弱两个方面。这一概念揭示了人类土地利用行为与生态系统碳收支之间的耦合关系。在“双碳”战略目标背景下，区域尺度的精准碳排放核算已成为当前环境管理与气候变化研究的前沿课题。城市碳排放核算分为直接碳排放核算和间接碳排放核算[6]，直接碳排放核算主要是核算耕地、林地和水域等土地的碳排放量，常用方法为基于土地利用类型的碳排放核算法。间接碳排放核算主要核算建筑用地的碳排放量，较为常见的方法为排放清单法。本文核算了耕地、林地和水域的碳排放值和碳汇值 (由于研究区草地的面积和排放系数较小，碳汇值绝对值远小于其他土地利用类型，故不纳入核算范围)，并通过整合建筑碳排放核算数据，系统估算了合肥市2010－2019年期间的年际碳排放总量。基于此，采用非线性回归分析方法，构建了NPP/VIIRS夜间灯光数据与碳排放量之间的定量关系模型。总的技术路线如图2所示。

用于直接碳排放核算的合肥市2010－2019年土地利用类型数据源于美国USGS (United States Geological Survey) 网站 (https://earthexplorer.usgs.gov) 的Landsat影像。本研究基于2010－2019年合肥市Landsat系列遥感影像数据，采用ENVI (Environment for visualizing images) 遥感图像处理平台对原始数据进行预处理。首先运用FLAASH模块进行大气校正处理，以消除大气散射影响；随后进行辐射定标转换，将DN (Digital number) 值转化为表观反射率。预处理完成后，利用合肥市行政边界矢量数据对影像进行裁切。本研究采用随机森林算法，将研究区地表覆盖类型划分为四类：耕地、林地、水域以及建设用地。该分类结果将作为基础数据支撑后续基于IPCC方法的区域碳排放清单核算工作。用于间接碳排放核算的数据源于2010－2019年的《合肥市统计年鉴》(https://tjj.hefei.gov.cn/index.html)。

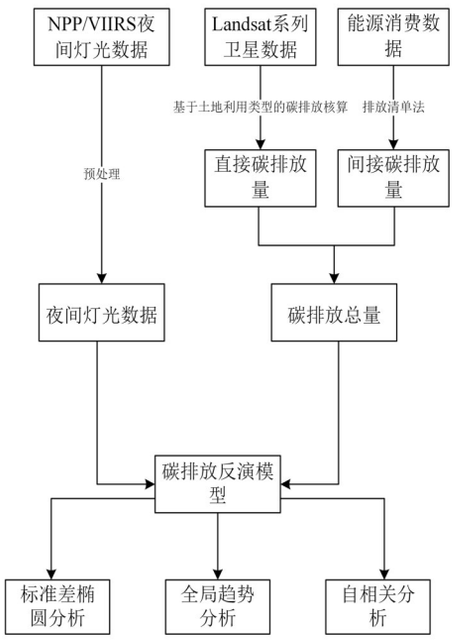

图 2　合肥市碳排放反演模型技术路线

Fig. 2　Technical route of carbon emission inversion model in Hefei City

夜间灯光辐射作为一种典型的人为地表特征，其空间分布强度与人类活动强度呈现显著的正相关关系，被广泛应用于城市扩张监测、经济发展评估及能源消费估算等研究领域。目前，较为主流的夜间灯光数据有三种，其中两种是美国军事气象卫星 (DMSP) 的卫星遥感影像[7]和 Suomi 国家极轨道伙伴关系卫星 (NPP) 遥感影像[8]。

本文采用搭载在NPP遥感卫星上的可见光红外成像辐射仪 (VIIRS) 的夜间灯光数据，该数据空间分辨率为500 m，通过中-低法去噪和灯光值量纲转换进行数据处理。

(1) 中-低法去噪处理

本研究采用中-低值阈值法对合肥市2012－2019年NPP-VIIRS夜间灯光数据进行了系统性的背景噪声抑制处理。基于合肥市区域特征分析，识别出主要噪声源包括：1) 地表反射噪声；2) 大气干扰噪声；3) 极光和其他背景噪声干扰。

(2) 灯光值量纲转换

NPP-VIIRS夜间灯光数据在ENVI和ArcGIS平台中数值量级过小，从而导致显示异常。为解决此问题，本研究采用数据标准化处理方法进行优化。利用ENVI遥感图像软件的波段运算功能对原始DN值进行线性变换处理，将各像元数值乘以10^9，使其转换为适合的灰度值范围。

2　研究方法

2.1　直接碳排放核算方法

将2010－2019年的合肥市Landsat影像在ENVI中进行处理。利用随机森林法对影像进行土地利用分类处理，本研究依据碳源/汇特征将研究区土地利用类型系统划分为四类：耕地、林地、水域及建筑用地。定量分析表明，耕地与建筑用地表现为碳源；而林地与水域则呈现显著碳汇功能。耕地、林地、水域的碳排放系

数如表1所示。直接碳排放量C_1的具体核算公式为

$$C_1=\sum_{i=1}^{3}A_i\alpha_i\,, \tag{1}$$

式中A_i为第i种土地利用类型 (耕地、林地、水域) 的面积 (m^2)，α_i为第i种土地利用类型的碳排放/吸收系数。

表1 主要土地利用类型碳排放系数

Table 1 Carbon emission coefficients of main land use types

土地利用类型	碳排放系数/($kg\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$)	参考文献
耕地	0.4595	[9]
林地	−0.6125	[9]
水域	−0.0253	[9]

2.2 间接碳排放核算方法

建筑全生命周期碳排放可划分为三个主要阶段：建造期、运营期和拆除期。其中，运营期碳排放 (即建筑运行能耗产生的间接排放) 在整个生命周期中占据主导地位，相关研究表明其贡献率可达70%～90%[10]。相比之下，建造期和拆除期不仅持续时间较短，碳排放量较少，而且相关基础数据获取存在较大困难，故本研究将重点研究建筑运行阶段的碳排放核算，并将数据作为间接碳排放数据。利用排放清单法对建筑碳排放进行核算，公式为

$$C_2=AB\,, \tag{2}$$

式中C_2为间接碳排放量，A为活动数据，B为排放因子。

将合肥市建筑分为公共建筑与居民住宅建筑，每种建筑的能耗都由用电量和其他能源消耗组成。其中，公共建筑用电量为第三产业用电量与交通运输用电量之差，而交通运输用电量占交通运输、仓储和邮政业用电总量的60%[11]；公共建筑其他能源消耗为第三产业能源消耗与交通运输能源消耗之差，所有的能源消耗均已折算成标准煤。本研究涉及的居民住宅建筑能耗数据主要来源于官方统计年鉴，其中电力消费数据以“万kW·h”为单位计量，其他能源消费量则统一折算为“万t标准煤 (等价值)”。在碳排放计算过程中，电力排放因子的确定参考了国家电网公司最新公布的华东区域电网基准排放因子 (详见表2)，该系数能准确反映研究区域电力生产的碳排放特征。标准煤碳排放系数采用国家发改委推荐值，为0.67 tCO_2/tce[12]。

表2 2010—2019年华东地区电力碳排放系数

Table 2 Carbon emission coefficient of electricity in East China from 2010 to 2019

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
$C/(tCO_2\cdot MW^{-1}\cdot h^{-1})$	0.71	0.83	0.82	0.81	0.80	0.81	0.80	0.80	0.79	0.79

3 结果与分析

3.1 直接碳排放核算结果

基于ArcGIS平台的分区统计功能，本研究获取了合肥市2010—2019年各土地利用类型的面积分布数

据 (图 3)。统计结果表明：合肥市土地利用类型中，耕地面积最大，其次为建筑用地和林地。不同利用类型的土地变化趋势有所不同，其中，耕地由 2010 年的 816 km^2 变为 2019 年的 577.36 km^2，呈逐年递减的趋势。而建筑用地则逐年递增，由 2010 年的 277.16 km^2 增加为 2019 年的 500.31 km^2，增加了 80.51%。其他两类的面积变化不大且占比较小。

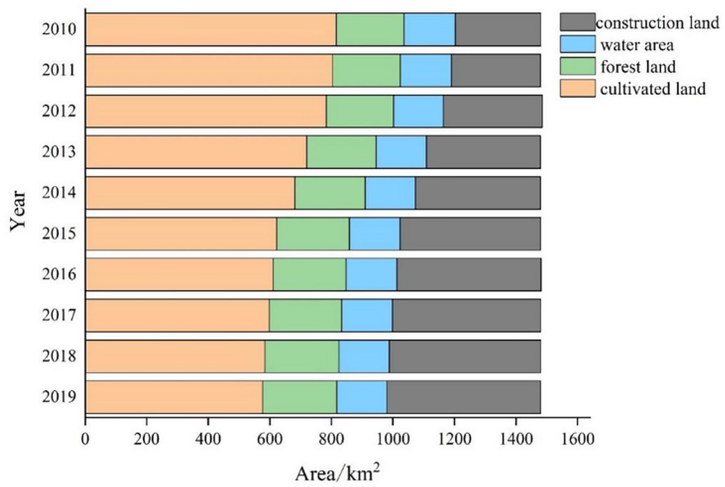

图 3　2010－2019 年合肥市主城区土地利用类型具体面积

Fig. 3　Specific area of land use types in the main urban area of Hefei City from 2010 to 2019

由式 (1) 可以计算得出水域、林地的碳汇量以及耕地的碳排放量，具体结果如图 4 所示 (正值是碳源效应，负值是碳汇效应)。由图可知，净碳排放量与各土地利用类型的碳源和碳汇功能存在显著关联。具体而言：林地表现出最强的碳汇能力，其贡献量超过碳汇总量的 70%，其他土地利用类型的碳汇贡献相对较小；从时间变化特征来看，林地碳汇总量呈现稳定但缓慢的增长趋势，年际变化幅度保持相对稳定，基本保持在 13.5 万 t～14.7 万 t 之间。水域生态系统因其面积的稳定性 (年际变异系数 < 5%)，其年均碳汇量基本维持在 4.2 万 t 的稳定水平 (2010－2019)。相比之下，耕地系统由于面积持续减少 (年均递减率 3.2%)，碳排放量呈现显著下降趋势，从 2010 年的 37.4 万 t 降至 2019 年的 26.5 万 t，累计降幅达 29.1%。

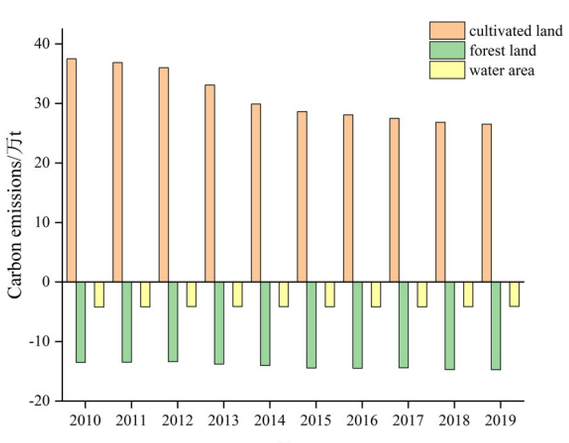

图 4　2010－2019 年合肥市主城区各类土地碳源碳汇值

Fig. 4　Carbon sink values of various land carbon sources in the main urban area of Hefei City from 2010 to 2019

3.2 间接碳排放结果

基于式 (2) 的计算结果及《合肥市统计年鉴》的数据 (表 3)，本研究分析了 2010－2019 年合肥市建筑碳排放的动态变化特征。主要结论如下：2010－2019 年间合肥市建筑领域碳排放呈现明显的增长，由初始年度的 1765.96 万 t 增加至 3716.58 万 t，增长率为 110.5%。同期，该市第三产业增加值从 1112.23 亿元增加至 5702.22 亿元。在能源利用效率方面，单位产值能耗指标持续降低，从 2010 年每万元产值消耗 0.78 tce 下降至 2019 年的 0.30 tce。

表 3 2010—2019 年合肥市建筑碳排放核算结果

Table 3 Accounting results of building carbon emissions in Hefei City from 2010 to 2019

年份	建筑碳排放总量/万 t	第三产业增加值/亿元	能源强度/(tce·万元$^{-1}$)
2010	1765.96	1112.23	0.78
2011	2243.15	1426.29	0.64
2012	2381.29	1631.37	0.6
2013	2470.91	1865.63	0.58
2014	2447.64	2066.18	0.42
2015	2652.93	2419.57	0.40
2016	2993.20	2822.97	0.35
2017	3195.89	3297.63	0.32
2018	3518.55	5157.56	0.31
2019	3716.58	5702.22	0.30

综合表 3 和图 3 的数据可以得到合肥市 2010－2019 年总的碳排放量 C_m，其计算公式为

$$C_m=C_1+C_2\,, \tag{3}$$

式中 C_1 为合肥市直接碳排放量，C_2 为合肥市间接碳排放量。

2010－2019 年合肥市主城区碳排放总量核算结果如图 5 所示。由图可知，2010－2019 年间，合肥市总碳排放量从 2010 年的 1785.72 万 t 上升到 2019 年的 3724.27 万 t，增长了 108.56%。

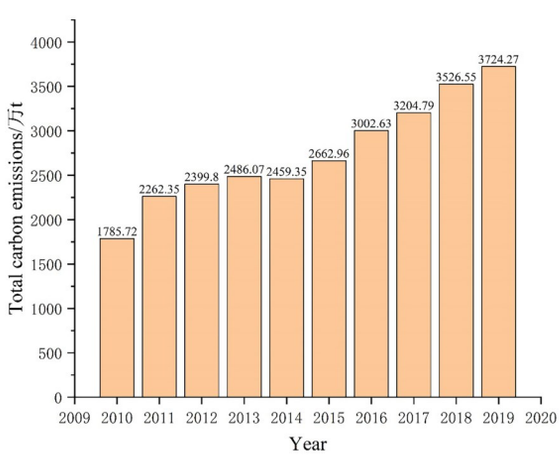

图 5 2010－2019 年合肥市主城区碳排放总量核算结果

Fig. 5 Accounting results of total carbon emissions in the main urban area of Hefei City from 2010 to 2019

3.3　碳排放时空分布

本研究利用 ArcGIS 10.2 平台对 2012－2019 年合肥市 NPP-VIIRS 夜间灯光数据进行处理，获取研究区夜间灯光灰度分布图，如图 6 所示。

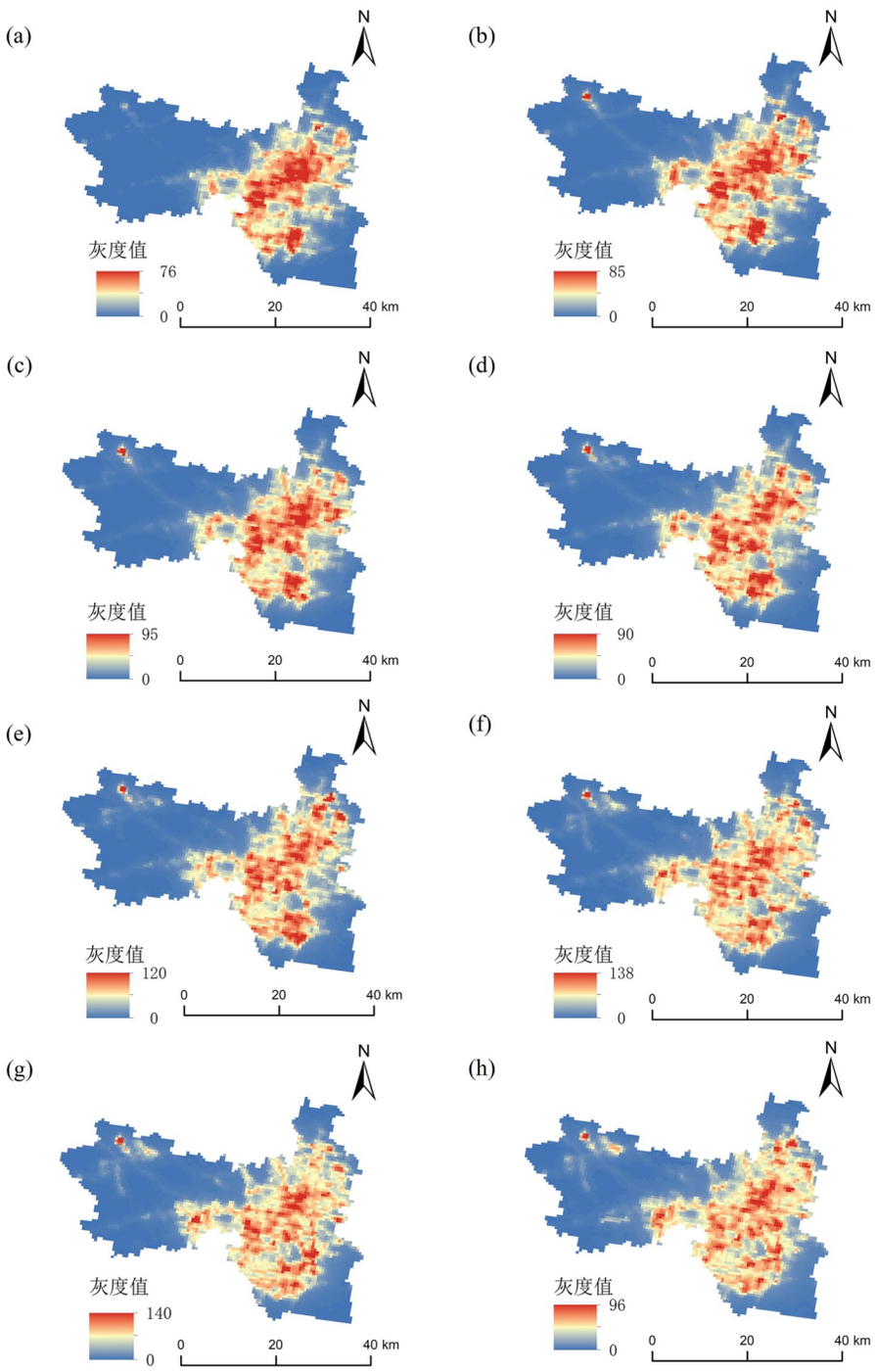

图 6　2012－2019 年合肥市 NPP-VIIRS 夜间灯光灰度值。(a) 2012 年; (b) 2013 年; (c) 2014 年; (d) 2015 年; (e) 2016 年; (f) 2017 年; (g) 2018 年; (h) 2019 年

Fig. 6　Gray value of NPP-VIIRS night lights in Hefei City from 2012 to 2019. (a) 2012; (b) 2013; (c) 2014; (d) 2015; (e) 2016; (f) 2017; (g) 2018; (h) 2019

分析结果表明：高亮度区域主要集中分布于庐阳区、包河区。年度最高灯光值呈现波动上升趋势：年最高灯光灰度值由2012年的76上升到最高2018年的140，但在2019年下降到96，2012－2019年总体增长幅度为26.3%。其中，滨湖新区灯光范围呈现明显的向巢湖方向的空间扩展态势，这一现象与合肥市“十二五”至“十三五”期间的城市空间发展趋势一致。

研究结果显示，合肥市2012－2019年碳排放总量与夜间灯光总灰度值之间存在显著的统计相关性(Pearson相关系数$r = 0.932$，$p < 0.01$)。通过SPSS 26.0软件建立三种数学模型进行拟合分析，模型比较结果见表4。其中，线性回归模型表现出最优的拟合度 (调整后$R^2 = 0.85$)。为提高模型的反演精度，本研究采用不含截距项的线性回归方程模型。

表4 2012—2019年合肥市NPP-VIIRS夜间灯光灰度值总值

Table 4 The total value of gray value of NPP-VIIRS night lights in Hefei City from 2012 to 2019

数学模型	拟合方程	调整后的R^2	Sig
线性回归模型	$y = 0.047x$	0.85	0.001
对数模型	$y = 3480.86\ln x - 35499.72$	0.82	0.001
幂函数模型	$y = 1.178x + e^{0.007}$	0.84	0.001

注: Sig (Significance level) 通常用于表示研究结果的显著性水平。

基于线性回归模型，将线性回归模型所得2012－2019年拟合值与对应的核算值对比，受回归函数误差影响，两者的值并不完全一致[13]。为了提高碳排放模型精度和保证碳排放时空分布的准确性，需要对模型进行修正。构建每一年碳排放量的修正系数，公式为

$$K_i = \frac{C_i}{C_i'}, \tag{4}$$

式中K_i表示第i年的修正系数，C_i为第i年的碳排放核算值，C_i'为第i年的线性回归模型拟合值。

利用修正后的拟合方程反演出各年份的合肥市碳排放量，并在ArcGIS平台中使用自然间断点分类法将合肥市年平均碳排放量分为5类。导出合肥市2012－2019年碳排放时空分布图，如图7所示。结果表明，合肥市碳排放量呈现明显的年际变化特征，碳排放峰值从2012年的2.72万t持续上升至2018年的6.71万t，但在2019年出现下降趋势。从空间分布来看，蜀山区、包河区和滨湖新区是主要的高碳排放集中区域，其中包河区和滨湖新区的高碳排放区范围呈现明显的扩张态势。

4 讨 论

4.1 碳排放标准差椭圆分析

利用ArcGIS平台的标准差椭圆工具绘制2012、2014、2016、2018年合肥市碳排放标准椭圆[14]。结果如图8所示，基于空间统计分析的结果表明：

碳排放标准差椭圆的面积明显增加，2012年到2016年其面积扩大了98.91%，扩张趋势明显。但从2016年到2018年，合肥市碳排放标准差椭圆面积缩减了4.6%，这一空间格局的演变趋势可能与合肥市在“十三五”规划期间实施的低碳城市发展战略密切相关，特别是通过产业结构调整和能源消费优化等措施有效降低了碳排放强度。

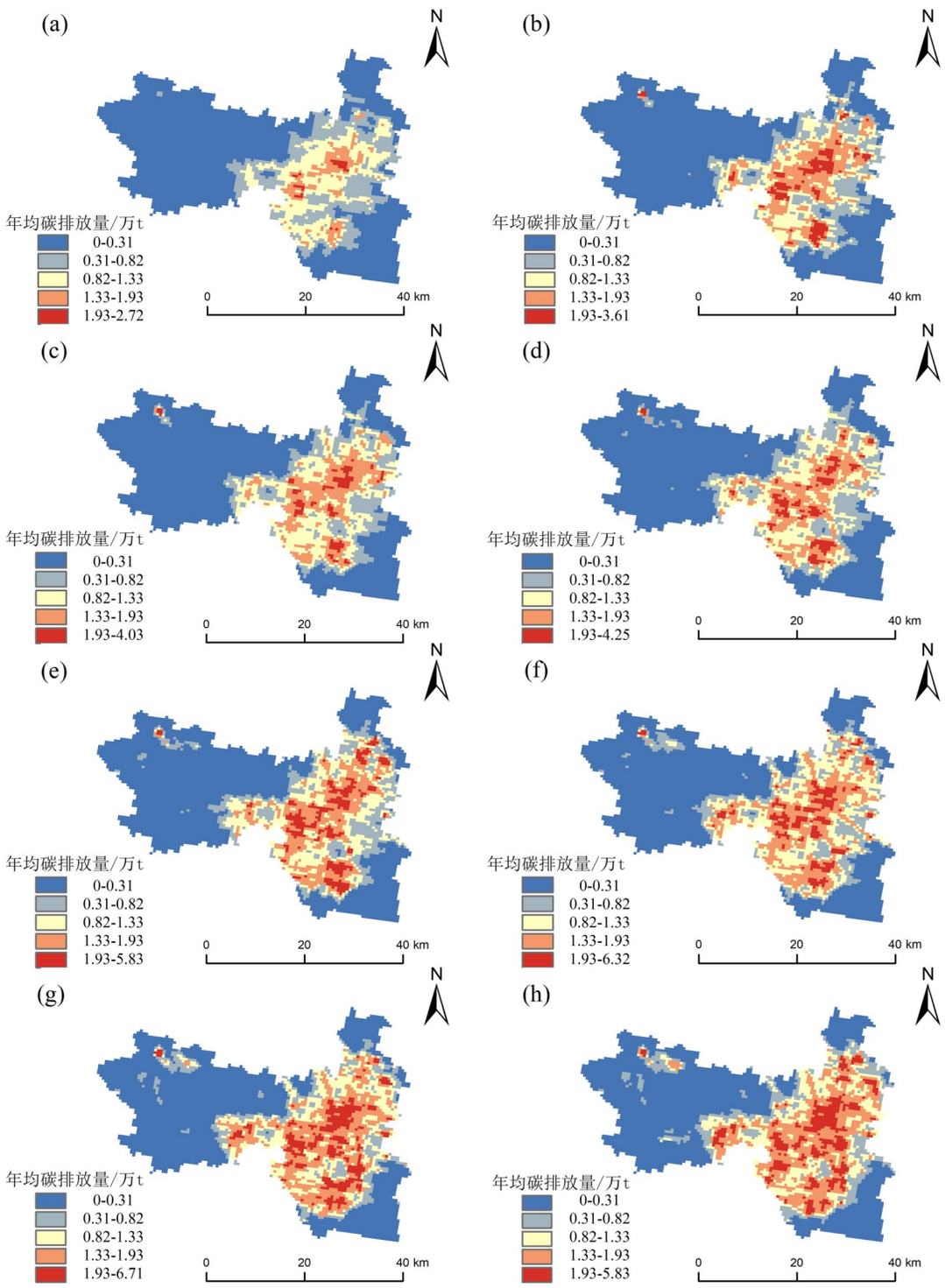

图 7　2012－2019 年合肥市碳排放量时空分布图。(a) 2012 年; (b) 2013 年; (c) 2014 年; (d) 2015 年; (e) 2016 年; (f) 2017 年; (g) 2018 年; (h) 2019 年

Fig. 7　Temporal and spatial distribution of carbon emissions in Hefei City from 2012 to 2019. (a) 2012; (b) 2013; (c) 2014; (d) 2015; (e) 2016; (f) 2017; (g) 2018; (h) 2019

在空间分布特征方面，碳排放标准差椭圆形态出现显著变化：2012 年呈现出明显的东北-西南轴向分布特征，而 2014 年之后则转变为西北-东南轴向分布。具体表现为：2012 年的标准差椭圆具有较大的长短轴

比 (形态偏扁)，显示出较强的方向性特征；而2014年之后的椭圆形态趋于圆形 (长短轴比减小)，表明碳排放的空间分布呈现多中心扩散态势，各区碳排放增长速度趋于均衡，区域差异逐步缩小。

碳排放重心的空间迁移轨迹分析显示，2012－2018年间重心主要分布在包河区与蜀山区。具体迁移路径为：初期 (2012年) 位于包河区，随后向蜀山区方向转移。迁移过程可分为三个阶段：第一阶段 (2012－2014年) 向西北方向移动3.07 km (偏转角26.7°)；第二阶段 (2014－2016年) 转向东北方向移动2.55 km (偏转角9.3°)；第三阶段 (2016－2018年) 又向西南方向回移0.9 km (偏转角45.7°)。这一迁移轨迹反映了合肥市产业布局和能源消费结构的空间重构过程。

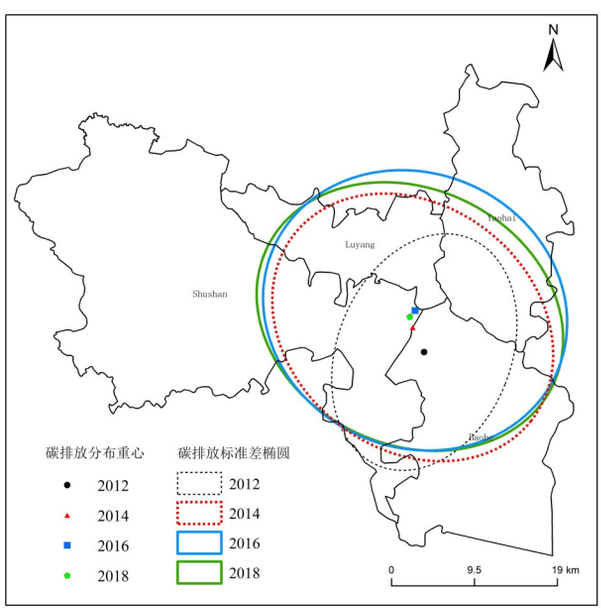

图 8　2012、2014、2016、2018年合肥市碳排放标准差椭圆发展趋势与质心转移

Fig. 8　Development trend and centroid shift of carbon emission standard deviation ellipse in Hefei City in 2012, 2014, 2016 and 2018

4.2　碳排放全局趋势分析

本研究运用ArcGIS全局趋势分析对合肥市2012－2018年间碳排放数据进行三维可视化处理。如图9所示，该三维趋势图以X轴 (东正西负)、Y轴 (北正南负) 表示地理方位，Z轴则表征碳排放强度数值。其中，青色散点代表所选点实际位置，其对应的绿色和蓝色投影点分别反映其南北向和东西向的空间映射，黑色垂直线段为各点位碳排放量，绿色和蓝色趋势线为南北方向和东西方向上的碳排放趋势拟合曲线。

结果表明，研究期内合肥市碳排放空间格局具有较大的一致性。东西方向具有明显的谷峰分布特征，形成倒“U”型曲线，即呈现出中部碳排放量较高、东西两侧碳排量较低的空间分布特征，且这种趋势在逐年加强。南北方向则表现为明显的梯度差异，碳排放强度自北向南呈现线性递增趋势。值得注意的是，自2014年起，研究区西北部逐渐形成稳定的碳排放区域，且在空间上有持续扩张态势。

4.3　碳排放空间自相关分析

基于ArcGIS地理信息平台，利用渔网图工具创建渔网网格，将2012－2019年碳排放均值数据分别赋值到渔网图矢量数据中，然后将渔网数据导入GeoDa软件中[15]。本研究采用GeoDa空间分析软件，基于优化

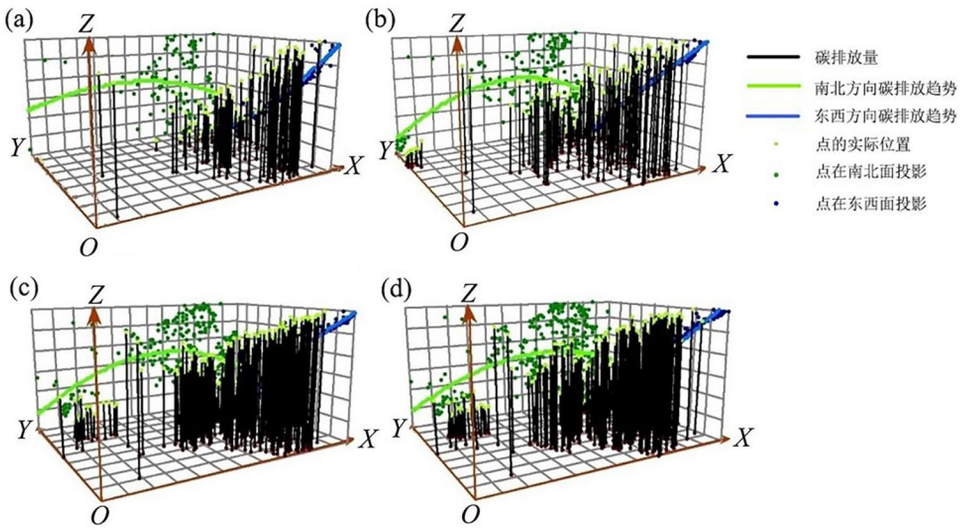

图 9　合肥市碳排放空间三维趋势图。(a) 2012 年; (b) 2014 年; (c) 2016 年; (d) 2018 年

Fig. 9　Three-dimensional trend map of carbon emissions in Hefei City. (a) 2012; (b) 2014; (c) 2016; (d) 2018

的空间权重矩阵，运用全局 Moran's *I* 指数进行碳排放的空间自相关特征分析。统计分析结果显示，Moran's *I* 指数达到 0.912 ($P < 0.05$)。图 10 为 2012－2019 年碳排放均值的 LISA (Local indicators of spatialassociation) 图。由图可知，空间聚类特征表现为：高-高 (HH) 集聚区主要集中分布在庐阳区东部、瑶海区南部、包河区以及经济技术开发区和滨湖新区等区域，呈现明显的空间连续性；而低-低 (LL) 集聚区在研究区内分布最为广泛，主要位于西部农业区、瑶海区北部以及巢湖水域周边地带。从各类集聚区的数量分布来看，HH 型、HL 型、LH 型和 LL 型网格单元分别为 572、1、2、837 个。

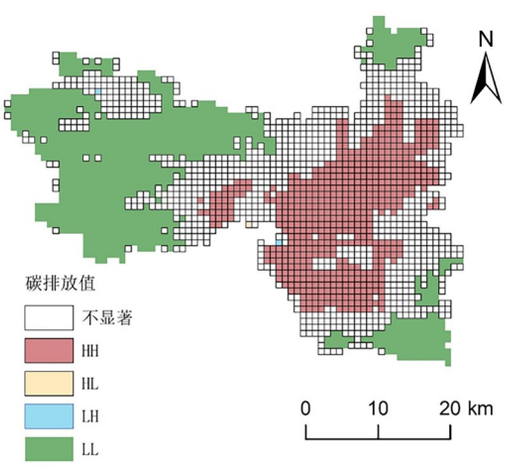

图 10　2012－2019 年合肥市碳排放均值的 LISA 图

Fig. 10　LISA map of average carbon emissions in Hefei City from 2012 to 2019

5　结　论

本研究对合肥市 2012－2019 年间的碳排放进行了系统评估与分析，包括直接排放和间接排放两个方面。基于 NPP-VIIRS 夜间灯光数据，构建了灯光总灰度值与碳排放总量的回归模型，进而绘制了研究区碳排放时空分布图谱。综合运用随机森林分类、排放清单法、空间统计分析等方法，得出以下主要结论：

1) 直接碳排放方面，对研究区内水域、林地的碳吸收功能与耕地的碳排放特征进行了量化分析。数据显示，林地作为最主要的碳汇载体，贡献了超过70%的碳汇量，其年碳汇量维持在13.5万t～14.7万t区间，呈现稳定态势。水域碳汇量则稳定在4.2万t左右。与之相对，受耕地面积持续减少影响，耕地碳排放量从2010年的37.4万t降至2019年的26.5万t，降幅达29.06%。

2) 间接碳排放方面，研究期内建筑领域碳排放呈现显著增长，从1765.96万t增至3716.58万t，增幅达110.5%。同期第三产业增加值从1112.23亿元增加至5702.22亿元，能源强度指标则从0.78 tce/万元降低至0.30 tce/万元。

3) 从总体碳排放格局来看，合肥市碳排放总量从1785.72万t增长至3724.27万t，增长率达108.56%。空间分析显示，2012－2018年间碳排放空间分布呈现规律性演变：早期 (2012年) 呈东北-西南轴向分布，后期转为西北-东南轴向。从空间分布来看，碳排放的空间分布呈现显著的区域差异：东西向呈中部高、两侧低的倒“U”型分布，且这一特征随时间增强；南北向则表现为明显的梯度分布，南部排放强度显著高于北部。

参考文献:

[1] Cai B F, Zhu S L, Yu S M, *et al*. The interpretation of *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory* [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(8): 1-11.
蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等. 《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》解读 [J]. 环境工程, 2019, 37(8): 1-11.

[2] Wang M L, Zhang H S. Research on population spatialization based on Luojia-1 nighttime light data [J]. *Geospatial Information*, 2021, 19(9): 53-56.
王美玲, 张和生. 基于珞珈一号夜间灯光数据的人口空间化研究 [J]. 地理空间信息, 2021, 19(9): 53-56.

[3] Sun X F. Spatialization and autocorrelation analysis of urban population kernel density supported by nighttime light remote sensing [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(11): 2256-2266.
孙小芳. 夜光遥感支持下的城市人口核密度空间化及自相关分析 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(11): 2256-2266.

[4] Liang Z, Huang J, Wei F L, *et al*. Identifying the spatial range of urban agglomerations in China based on night light remote sensing and POI data [J]. *Geographical Research*, 2020, 39(1): 92-102.
梁 泽, 黄 姣, 韦飞黎, 等. 基于夜光遥感影像与百度POI数据的中国城市群空间范围识别方法 [J]. 地理研究, 2020, 39(1): 92-102.

[5] Yang B, Qin G P, Wu Q. Analysis of provincial CO_2 emission accounting in China under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(12): 5840-5849.
杨 柏, 秦广鹏, 邬 钦. “双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 [J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5840-5849.

[6] Niu Y W, Zhao X C, Hu Y J. Spatial variation of carbon emissions from county land use in Chang-Zhu-Tan area based on NPP-VIIRS night light [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(9): 3847-3856.
牛亚文, 赵先超, 胡艺觉. 基于NPP-VIIRS夜间灯光的长株潭地区县域土地利用碳排放空间分异研究 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3847-3856.

[7] Shi K F, Chen Y, Yu B L, *et al*. Modeling spatiotemporal CO_2 (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis [J]. *Applied Energy*, 2016, 168: 523-533.

[8] Wu Y, Li H B. Spatial change and correlations of desakota regions in a metropolitan area using NPP/VIIRS nighttime light

data: A case study of Wuhan City [J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(1): 13-23.

[9] Li Y M, Shen Y H, Wang S H. Spatio-temporal characteristics and effects of terrestrial carbon emissions based on land use change in Anhui Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation,* 2022, 36(1): 182-188
李彦旻, 沈育生, 王世航. 基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 182-188.

[10] Cai W G. *Analyzing Impact Factors of Building Energy Consumption: Modeling and Empirical Study* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
蔡伟光. 中国建筑能耗影响因素分析模型与实证研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.

[11] Liu X H, Liao C P, Huang Y, *et al.* Analysis of factors affecting building carbon emissions and emission reduction measures in Guangzhou based on STIRPAT model [J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(5): 769-775.
刘兴华, 廖翠萍, 黄 莹, 等. 基于STIRPAT模型的广州市建筑碳排放影响因素及减排措施分析 [J]. 可再生能源, 2019, 37(5): 769-775.

[12] Wan L L, Lin C X, Chen Y. Temporal and spatial patterns of interprovincial carbon compensation in China based on relative carbon deficit [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(12): 2572-2583.
万伦来, 林春鑫, 陈 艺. 基于相对碳赤字的中国省际碳补偿时空格局研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2572-2583.

[13] Gu Y Y, Qiao X N, Fan L X, *et al.* Spatial analysis of carbon emissions from region energy consumption based on night light data [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(2): 140-146.
顾羊羊, 乔旭宁, 樊良新, 等. 夜间灯光数据的区域能源消费碳排放空间化 [J]. 测绘科学, 2017, 42(2): 140-146.

[14] Song F L, Han C F, Teng M M. Analysis of driving factors and optimization strategies of energy consumption carbon emissions in the Yangtze River Delta [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(4): 21-28.
宋府霖, 韩传峰, 滕敏敏. 长三角地区能源消费碳排放驱动因素分析及优化策略 [J]. 生态经济, 2022, 38(4): 21-28.

[15] Zhang J X, Gong J, Ma X C, *et al.* GeoDA-based spatial correlation analysis of landscape fragmentation in Bailongjiang Watershed of Gansu [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(5): 1476-1483.
张金茜, 巩 杰, 马学成, 等. 基于GeoDA的甘肃白龙江流域景观破碎化空间关联性 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1476-1483.